



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## بررسی تجربی تأثیر عملیات سطحی مختلف بر رفتار شکست مود اول اتصال چسبی کامپوزیت - آلومینیوم

امیر کریمان مقدم<sup>1</sup>، سعید رهنما<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/615، srahnama@birjand.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله:

دریافت: 1401/12/03

پذیرش: 1402/02/25

## کلیدواژگان

عملیات سطحی، اتصال چسبی، کامپوزیت، مود اول شکست

اتصال چسبی در مقایسه با روش‌های اتصال مکانیکی دارای توزیع تنش یکنواخت، عملکرد خستگی مناسب‌تر و اثر کاهش وزن بهتر می‌باشد. برخی از خرابی‌ها در اتصال چسبی به دلیل وجود آلودگی و زبری نامناسب در سطوح اتصال ایجاد می‌شوند. در این مطالعه تأثیر عملیات سطحی مختلف بر رفتار مکانیکی اتصال چسبی کامپوزیت/آلومینیوم مود اول شکست و با استفاده از نمونه تیریکسرگردار دولبه بررسی می‌شوند. عملیات سطحی با سه روش پوسته‌کنی، سنباده‌زنی و لیزر برای چسبیده‌های کامپوزیتی و دو روش سنباده‌زنی و لیزر برای چسبیده‌های آلومینیومی انجام شده است. در روش عملیات سطحی لیزری فاصله عرضی شیارها و قطر دایره لیزر ثابت و سرعت اسکن و توان دستگاه متغیر در نظر گرفته شده است. زبری سنجی سطح چسبیده‌ها نشان دهنده افزایش زبری سطح تا مقدار مشخصی از چگالی انرژی لیزر می‌باشد، اما بعد از آن بدلیل ذوب شدن سطح چسبیده‌ها زبری کاهش یافته است. بررسی نتایج نشان دهنده افزایش 13.43٪ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست با استفاده از روش عملیات سطحی لیزر نسبت به روش سنباده‌زنی و افزایش 7.46٪ نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست نسبت به روش پوسته‌کنی می‌باشد. همچنین بررسی سطح شکست اتصال نشان دهنده افزایش حالت شکست پارگی الیاف در سطح اتصال با انتخاب درست پارامترهای لیزر می‌باشد که باعث بهبود استحکام اتصال شده است.

## Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint

Amir Kariman Moghadam<sup>1</sup>, Saeed Rahnama<sup>1\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

\* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, srahnama@birjand.ac.ir

## Keywords

Surface Treatment, Adhesive Joint, Composite, Mode I Fracture

## Abstract

Compared to mechanical joining methods, adhesive bonded joints have uniform stress distribution, good fatigue performance and better weight reduction effect. Some failures in the adhesive bonded joints are caused by the presence of contamination and inappropriate roughness in the joint surfaces. In this study, the effect of different surface treatment on the mechanical behavior of the composite/aluminum adhesive joint in the mode I of fracture is investigated by using Double-cantilever beam specimen. Surface treatment has been done with three methods of Peel Ply Processing, Sanding and Laser for composite adherent and two methods of Sanding and Laser for aluminum adherent. In the laser surface treatment method, the transverse distance of the grooves and the spots diameter are fixed, and the scanning speed and power of the machine are variable. The surface roughness measurement of the adherents shows the increase of the surface roughness up to a certain value of the laser energy density, but after that the roughness has decreased due to the melting of the adherent surface. The results show an increase of 13.43% and 7.46% in the critical strain energy release rate of the mode I of fracture using the laser surface treatment method compared to the Sanding method and the Peel Ply Processing method, respectively. Also, examination of the fracture surface of the joint shows an increase in the failure mode of fiber tearing at the joint surface with the correct selection of laser parameters, which has improved the strength of the joint.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Kariman Moghadam, A., Rahnama, S., "Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2116-2127, 2023.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1990008.1828

## 1- مقدمه

ماده چسبیده (قطر دایره لیزر، توان دستگاه، سرعت اسکن و فاصله عرضی شیارها) دارد [4]. شکل 1 نحوه اجرای عملیات سطحی با استفاده از روش لیزر را نشان می‌دهد.

سطح برای پاکسازی آلودگی روغن، حذف لایه اکسید (در فلزات) و تحریک فعالیت سطحی آماده‌سازی می‌گردد. افزایش زبری سطح تا حد مشخصی نیز می‌تواند باعث افزایش استحکام اتصال گردد [5]. در مطالعات قبلی روش‌های عملیات سطحی مختلفی مانند اچ شیمیایی، عملیات پلاسما، سایش مکانیکی، سندبلاست و عملیات سطحی لیزری انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

رادوسکی تأثیر عملیات مکانیکی بر زبری سطح و خواص مکانیکی اتصال چسبی تک لبه فولادی را بررسی کرده است. روش‌های عملیات سطحی سنگ-زنی<sup>۴</sup>، نرمه پرداخت‌کاری<sup>۵</sup> و پرداخت‌کاری عالی<sup>۶</sup> استفاده شده است [6]. هر سه روش عملیات مکانیکی سطوح باعث افزایش استحکام برشی اتصال گردیده است اما روش نرمه پرداخت‌کاری بیشترین تأثیر را بر افزایش استحکام برشی داشته است. سورنتینو و همکارانش تأثیر عملیات سطحی اتصال چسبی الیاف کربن بر مقاومت مکانیکی و شکل شناسی شکست را با استفاده از نمونه تک لبه بررسی کردند [7]. در این تحقیق از سه روش ماسه‌زنی، سنگ‌زنی و پوسته-کنی برای عملیات سطحی استفاده شده است، نتایج نشان دهنده کاهش استحکام اتصال با استفاده از روش پوسته کنی بوده است.

نجف پور و همکارانش تأثیر کیفیت سطح در عمر خستگی قطعات آلومینیومی ترمیم شده با وصله کامپوزیتی را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان دهنده افزایش عمر خستگی تا 7٪ با انتخاب سنباده مناسب بوده است [8]. ژان و همکارانش تأثیر عملیات سطحی با اشعه لیزر مادون قرمز<sup>۷</sup> و روش پوسته کنی<sup>۸</sup> را در اتصال چسبی الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند [9]. در این تحقیق از نمونه تک لبه برای بررسی تأثیر عملیات سطحی استفاده شده است. نتایج نشان دهنده افزایش استحکام برشی در هر دو روش نسبت به سطوح عملیات سطحی نشده می‌باشد، اما روش پوسته کنی تأثیر بیشتری بر استحکام برشی اتصال چسبی دارد.

سان و همکارانش تأثیر عملیات سطحی توسط لیزر بر خواص شیمیایی، شکل شناسی و استحکام برشی اتصال چسبی تک لبه کامپوزیت/کامپوزیت را بررسی کردند [10]. آن‌ها تأثیر افزایش چگالی انرژی لیزر بر استحکام برشی

پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) به دلیل استحکام ویژه و مدول الاستیک بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و مقاومت در برابر خستگی، به طور گسترده در صنایع هوافضا، الکترونیک، خودرو، دریایی، صنایع راه‌آهن و سایر بخش‌ها استفاده می‌شوند. برای بهبود عملکرد سازه‌های مهندسی و در عین حال کاهش هزینه‌ها، طراحی سازه‌ها بر اساس ویژگی‌های مواد مختلف و استفاده ترکیبی از چند ماده (به ویژه استفاده ترکیبی از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن و فلزات) انجام می‌شود. فن‌آوری اتصال بین پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن و سایر مواد یک موضوع بسیار مهم در استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در کاربردهای عملی است. در مقایسه با روش‌های اتصال مکانیکی سنتی، اتصال چسبی دارای توزیع تنش یکنواخت، عملکرد خستگی خوب و اثر کاهش وزن بهتر می‌باشد [1].

در میان عوامل مؤثر بر استحکام اتصالات چسبی، عملیات سطحی چسبیده‌ها قبل از ایجاد اتصالات چسبی یکی از عوامل بسیار مهم می‌باشد. عملیات سطحی لایه‌های مرزی ضعیف را از بین می‌برد، سطح را تمیز می‌کند، انرژی سطح (در درجه اول از طریق اکسیداسیون) را تغییر می‌دهد و ویژگی‌های میکرومکان‌نگاری<sup>۱</sup> را بهبود می‌بخشد. اثر خالص این تغییرات پیوند بین سطحی، اتصال مکانیکی بین چسب و چسبیده و مقاومت بیشتر در برابر عوامل محیطی و به ویژه اثر رطوبت می‌باشد [2]. برای به دست آوردن استحکام بهینه اتصال چسبی، افزایش انرژی سطح بستر با فرآیندهای عملیات سطوح خاص ضروری است. یک عملیات سطحی مناسب باید باعث پخش آسان چسب روی چسبیده و تقویت‌کننده تعامل مولکولی و جذب فیزیکی شود. شکل-شناسی<sup>۲</sup> سطح چسبیده عملیات سطحی شده باید منجر به پیوندهای مکانیکی برای تقویت اتصال شود. عملیات مکانیکی مانند ماسه‌زنی، سنباده‌زنی و سنگ-زنی سطح بالاتری را برای ایجاد اتصال ایجاد می‌کند. این عملیات سطحی استحکام اتصال را افزایش می‌دهد، اما باعث ناهمگونی سطح عملیات سطحی شده و در نتیجه دوام پایین اتصال می‌شود [3,4].

همچنین روش عملیات سطحی شیمیایی مانند حکاکی یا آندایزینگ<sup>۳</sup> و پوشش با مواد شیمیایی فعال به عنوان جایگزین عملیات مکانیکی استفاده می‌شود. چنین عملیاتی، سطح را فعال می‌کند و باعث ایجاد شکل‌شناسی متخلخل و همگن می‌شود. با این حال، عملیات شیمیایی برای امنیت انسان و محیط زیست خطرناک هستند [4].

یک جایگزین مناسب برای عملیات سطحی ساینده و شیمیایی استفاده از لیزر و پلاسما است. عملیات سطحی پلاسما دو عیب دارد: زمان باز بسیار کوتاه (چند ساعت) که بدان معنی است پیوند باید بلافاصله پس از اصلاح انجام شود و نیاز به خلاء و گازهای مخصوص برای انجام عملیات سطحی است [4]. برای اتصال چسب از لیزرهای برقی استفاده شده و استحکام اتصال به طرز چشمگیری بهبود یافته است. بسترهای آزمایش شده شامل آلیاژهای آلومینیوم، آلومینا، مس، پلیمرهای مختلف، کامپوزیت‌ها، آلیاژهای تیتانیوم، الیاف پلی‌اتیلن، الیاف کولار و غیره بودند. نتایج نشان داده است که استحکام اتصال با تمیز کردن سطح از آلاینده‌ها، از بین بردن لایه‌های مرزی ضعیف، ایجاد اتصال متقابل و ایجاد یک شکل‌شناسی زبر و بسیار یکنواخت بهبود یافته است. همچنین عملیات سطحی با لیزر تأثیری بر خواص مکانیکی چسبیده ندارد [4]. عملیات سطحی بهینه لیزر نیاز به انتخاب پارامترهای مناسب فرآیند برای هر

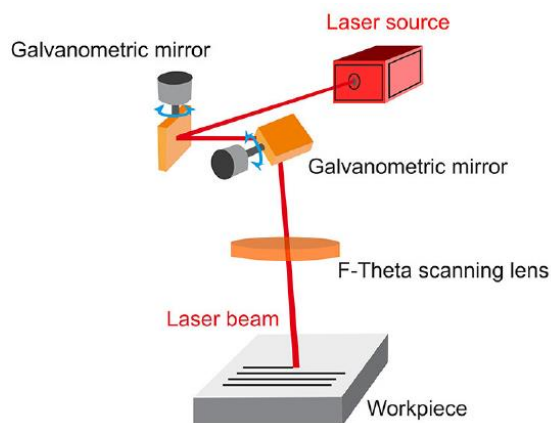


Fig. 1 laser surface treatment process

شکل 1 فرآیند عملیات سطحی لیزری

<sup>5</sup> Lapping

<sup>6</sup> Superfinish

<sup>7</sup> Infrared Laser Processing

<sup>8</sup> Peel Ply Processing

<sup>1</sup>Micro- Topographical

<sup>2</sup> Morphology

<sup>3</sup> Anodizing

<sup>4</sup> Grinding

برای تولید چسبنده کامپوزیتی از الیاف کربن تک جهت با وزن 250 گرم در هر مترمربع به عنوان تقویت کننده و رزین اپوکسی LR660 به عنوان زمینه استفاده شده است. تعداد لایه‌های چسبنده کامپوزیتی 11 عدد و با زاویه صفر درجه می‌باشد. چسبنده‌های کامپوزیتی جهت کاهش حباب‌های هوا با روش نفوذ در خلاء (VIP) ساخته شده‌اند. مطابق با استاندارد ASTM D2584 کسر حجمی الیاف 59.4٪ محاسبه شده است. همچنین خواص مکانیکی چسبنده کامپوزیتی مطابق با استاندارد ASTM D3039 از آزمایش تجربی بدست آمده است. خواص مکانیکی چسبنده کامپوزیتی مطابق جدول 1 می‌باشد. جنس چسبنده آلومینیومی از آلومینیوم T6 - 7075 که بطور گسترده در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌باشد. همچنین برای ایجاد اتصال از چسب دو جزئی Araldite 2015 استفاده شده است. خواص مکانیکی آلومینیوم T6-7075 و چسب Araldite 2015 مطابق جدول 2 می‌باشد.

## 2-2- آماده‌سازی سطوح اتصال

برای آماده‌سازی سطح چسبنده‌ها از سه روش پوسته کنی (PP)، سنباده زدن (S) و عملیات سطحی لیزر (LA) استفاده شده است. برای نمونه‌های (PP) از روش پوسته کنی برای آماده‌سازی سطح چسبنده کامپوزیتی استفاده شده و از سنباده شماره 120 برای آماده‌سازی سطح چسبنده آلومینیومی استفاده شده، همچنین در رویکرد سنباده زدن برای هر دو چسبنده کامپوزیتی و آلومینیومی از سنباده شماره 120 استفاده شده است. عملیات سطحی لیزر توسط دستگاه Yb: fiber با حداکثر توان نامی 30 وات، طول موج 1050 نانومتر و فرکانس 20 کیلوهرتز انجام شده است. الگوی عملیات سطحی عمود بر مسیر رشد ترک در تمامی نمونه‌ها می‌باشد. همچنین چگالی انرژی لیزر به عنوان پارامتر مؤثر در تغییر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. چگالی انرژی لیزر مطابق رابطه زیر بدست می‌آید [16].

$$ED = \frac{P}{V \phi_s} \quad (2)$$

در این رابطه ED چگالی انرژی پالس، V سرعت اسکن و  $\phi_s$  قطر دایره لیزر می‌باشد. در این پژوهش 7 حالت مختلف برای چسبنده‌های کامپوزیتی و آلومینیومی مطابق با جدول 3 برای عملیات سطحی لیزر با فاصله عرضی شیارها 50  $\mu\text{m}$  در نظر گرفته شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی چسبنده کامپوزیتی

Table 1 Mechanical properties of composite adherent

$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	$E_{33}$	$E_{22}$	$E_{11}$
	(GPa)	(GPa)	(GPa)
0.29	7.43	7.43	94.5

جدول 2 خواص مکانیکی چسبنده آلومینیومی و چسب [14,15]

Table 2 Mechanical properties of aluminum adherent and adhesives [14,15]

	$\nu$	E
		(GPa)
Araldite 2015	0.3	1.85
AL 7075-T6	0.33	71.4

را در ده حالت مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان دهنده افزایش استحکام برشی با افزایش چگالی انرژی لیزر تا حد مشخصی بوده است. تاو و همکارانش تاثیر عملیات سطحی توسط لیزر CO<sub>2</sub> بر چقرمگی شکست مود اول شکست را در اتصال چسبی کامپوزیتی با استفاده از نمونه تیر یکسرگردار دولبه بررسی کردند [11]. در نتایج آن‌ها روش ماسه‌زنی (SB) بیشترین مقدار چقرمگی شکست، روش پوسته‌کنی (PP) کمترین مقدار چقرمگی شکست و تابش لیزر CO<sub>2</sub> بین روش پوسته‌کنی و روش ماسه‌زنی بوده است. موریرا و همکارانش تاثیر عملیات سطحی توسط لیزر Yb-KYW را بر رفتار اتصال چسبی کامپوزیت/کامپوزیت در مود اول شکست را بررسی کردند [12]. آن‌ها از نمونه تیر یکسرگردار دولبه برای انجام آزمون‌های استاتیکی استفاده کرده‌اند. در تحقیق آن‌ها توان لیزر و فاصله شیارها ثابت و قطر دایره لیزر و سرعت اسکن متغیر در نظر گرفته شده بود. نتایج نشان دهنده افزایش تا 10٪ در چقرمگی شکست مود اول با انتخاب مناسب پارامترهای لیزر می‌باشد.

در این مقاله تاثیر سه نوع عملیات سطحی سنباده‌زنی، پوسته کنی و لیزر در اتصال چسبی مود اول شکست آلومینیوم - پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن با استفاده از نمونه تیر یکسرگردار دولبه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در عملیات سطحی لیزر قطر دایره لیزر و فاصله عرضی شیارها ثابت خواهند بود اما سرعت اسکن و توان نامی دستگاه برای داشتن سطوحی با زبری متفاوت متغیر خواهد بود. تاثیر نوع عملیات سطحی بر زبری سطح چسبنده‌ها، چقرمگی شکست مود اول شکست و همچنین سطح شکست ایجاد شده در اتصال مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## 2- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا مراحل آماده‌سازی نمونه‌های تیر یکسرگردار دولبه ارائه خواهد شد، سپس مراحل انجام آزمون مود اول شکست بیان خواهد شد.

### 2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی رفتار اتصال چسبی در مود اول شکست مطابق استاندارد ASTM D5528 از نمونه تیر یکسرگردار دولبه استفاده شده است. هندسه نمونه تیر یکسرگردار دولبه در شکل 2 نشان داده شده است. در شکل 2 طول کلی نمونه  $(L = 200 \text{ mm})$ ، ضخامت چسبنده آلومینیومی  $(h_{AL} = 3 \text{ mm})$ ، عرض نمونه  $(B = 25 \text{ mm})$  و ضخامت چسب  $(t_{adhesive} = 0.4 \text{ mm})$  می‌باشند. ضخامت چسبنده کامپوزیتی  $(h_{CFRP})$  برای داشتن نمونه متقارن طبق رابطه زیر بدست می‌آید [13]:

$$\frac{h_{CFRP}}{h_{AL}} = \left( \frac{E_{AL}}{E_{CFRP}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $E_{AL}$  مدول یانگ آلومینیوم و  $E_{CFRP}$  مدول یانگ چسبنده کامپوزیتی می‌باشد. بعد از محاسبه مدول یانگ چسبنده کامپوزیتی در جهت الیاف و قرار دادن در رابطه 1  $h_{CFRP} = 2.6 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. همچنین طول ترک اولیه  $(a_0 = 60 \text{ mm})$  می‌باشد.

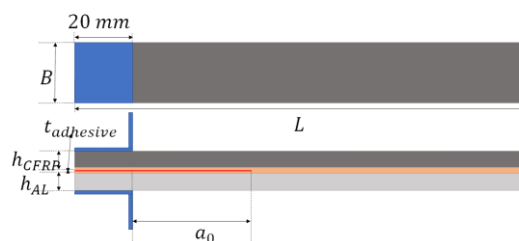


Fig. 2 Double-cantilever beam geometry

شکل 2 هندسه تیر یکسرگردار دولبه

Table 3 Laser surface treatment parameters

شماره نمونه	چسبنده آلومینیومی			چسبنده کامپوزیتی		
	توان نامی متوسط (W)	سرعت اسکن (mm/s)	چگالی انرژی لیزر (J/mm <sup>2</sup> )	توان نامی متوسط (W)	سرعت اسکن (mm/s)	چگالی انرژی لیزر (J/mm <sup>2</sup> )
LA - 1	6	1000	0.17	4.5	1500	0.085
LA - 2	9	1000	0.34	6	2000	0.085
LA - 3	18	1000	0.51	9	1200	0.21
LA - 4	12	300	1.14	7.5	1000	0.21
LA - 5	18	300	1.71	13.5	1500	0.25
LA - 6	12	90	3.81	10.5	800	0.37
LA - 7	18	90	5.71	12	600	0.37

که  $F$  بار اعمالی،  $\delta$  جابه‌جایی نقطه اعمال بار،  $b$  عرض نمونه و  $a$  طول ترک اولیه می‌باشد. در عمل این عبارت بدلیل اینکه تیر به طور کامل گیردار نیست و امکان چرخش در حین بارگذاری وجود دارد، مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی را بیشتر محاسبه می‌کند. به همین دلیل برای از بین بردن اثرات چرخش و اصلاح رفتار تیر یکسرگیردار یک مقدار اصلاحی  $|\Delta|$  به طول ترک  $a$  اضافه می‌شود ( $a + |\Delta|$ ). مقدار  $|\Delta|$  به صورت عملی و از نمودار ریشه سوم نرمی  $G^{1/3} = \left(\frac{\delta}{b}\right)^{1/3}$  برحسب طول ترک  $a$  بدست می‌آید. شکل 4 به صورت شماتیک منحنی  $G^{1/3}$  را برحسب طول ترک و مقدار اصلاحی  $\Delta$  را نشان می‌دهد. در نتیجه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی در روش تیر اصلاح شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$G_{IC} = \frac{3F_c \delta_c}{2B(a + |\Delta|)} \quad (4)$$



Fig. 3 Test equipments

شکل 3 تجهیزات آزمون

فرآیند عملیات سطحی لیزری برای چسبنده CFRP به این شکل است که الیاف کربن توسط تابش لیزر ارسالی ابتدا در طی فرآیند لیزر گرم می‌شوند، زیرا هدایت حرارتی عمودی الیاف کربن از رزین بیشتر است. سپس الیاف کربن گرما را به محیط اطراف هدایت می‌کنند و در نهایت، رزین سطح حذف می‌شود [9].

#### 3-2- شکل‌شناسی سطح چسبنده‌ها

در تحقیق حاضر برای شکل‌شناسی سطح عملیات سطحی شده چسبنده‌ها از میکروسکوپ الکترونی و دوربین دیجیتال استفاده شده است. همچنین از دستگاه زبری سنجی TR200 جهت بررسی زبری متوسط سطح چسبنده‌ها استفاده شده است.

#### 4-2- تجهیزات آزمون مود اول شکست

آزمون مود اول شکست مطابق با استاندارد ASTM D5528 انجام شده است. دستگاه آزمون کشش زونیک -250 با ظرفیت 5 تن و مجهز به نیروسنج 2 کیلونیوتنی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. همچنین دوربین دیجیتال سونی با سرعت فیلم‌برداری 100 فریم بر ثانیه برای ثبت رشد ترک در حین انجام آزمون استفاده شده است. شکل 3 تصویری از تجهیزات آزمون مود اول شکست را نشان می‌دهد. مطابق با استاندارد برای هر حالت تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، همچنین آزمون مود اول به صورت کنترل جابه-جایی و با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه توسط نیروسنج 2 کیلونیوتنی انجام شده است.

#### 5-2- رویکرد محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست

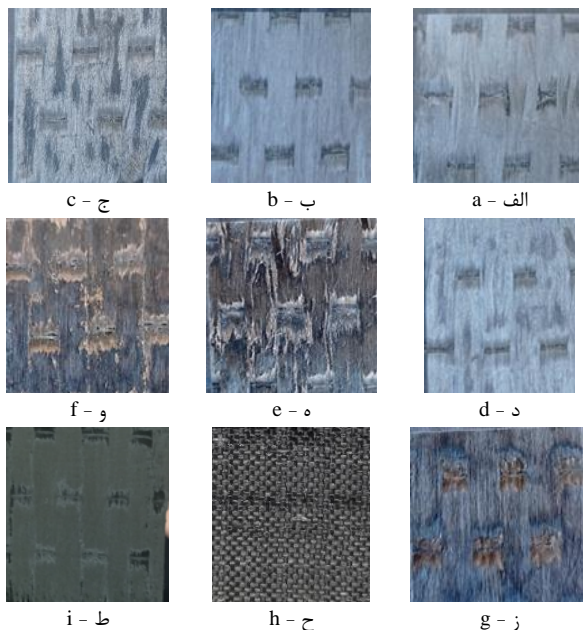
در این تحقیق نرخ رهایی انرژی کرنشی با روش تئوری تیر اصلاح شده، محاسبه شده است. معادله نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش تیر ساده، برای یک تیر یکسرگیردار ساده به صورت زیر است [17]:

$$G = \frac{3F\delta}{2Ba} \quad (3)$$

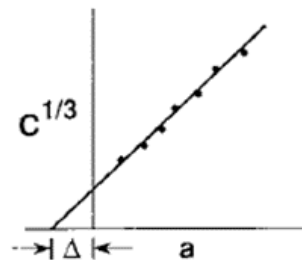
<sup>1</sup> Vertical thermal conductivity

همچنین با توجه به شکل 5.f و 5.g با افزایش چگالی انرژی لیزر به 3.81 J/mm<sup>2</sup> و 5.71 J/mm<sup>2</sup> سطح آلومینیوم ذوب شده و شیارهای ایجاد شده را پر می کند. شکل 6 تصویربرداری توسط دوربین دیجیتال از سطح چسبنده های کامپوزیتی با حالت های مختلف آماده سازی سطح را نشان می دهد. همان طور که در شکل 6 نشان داده شده است، با افزایش چگالی انرژی لیزر مقدار رزین باقی مانده در سطح چسبنده های کامپوزیتی کاهش پیدا کرده است که باعث ایجاد اتصال بین چسب و الیاف کربن می شود. همچنین با توجه به شکل 6.e و 6.f با کاهش سرعت اسکن و توان دستگاه لیزر که باعث تغییر انرژی لیزر از 0.25 J/mm<sup>2</sup> به 0.37 J/mm<sup>2</sup> شده است، تغییر زیادی در مقدار رزین باقی مانده در سطح چسبنده کامپوزیتی مشاهده نشده است، و این بیانگر این موضوع است که با سرعت بیشتر و صرف انرژی کمتر در نمونه LA5 می توان کیفیت سطح یکسانی با نمونه LA6 ایجاد نمود. همچنین روش پوسته کنی باعث ایجاد یک سطح با زبری یکنواخت و روش سنباده زنی باعث سایش لایه رزین سطحی چسبنده کامپوزیتی و ایجاد یک سطح زبر شده است.

در ادامه زبری متوسط چسبنده های کامپوزیتی و آلومینیومی ارائه شده است. شکل 7 نتایج زبری سنجی برای چسبنده های کامپوزیتی و آلومینیومی را نشان می دهد. با توجه به شکل 7 سعی شده است پارامترهای دستگاه لیزر برای چسبنده کامپوزیتی به نحوی انتخاب گردد که زبری سطح آلومینیوم و کامپوزیت دارای اختلاف کم باشند. همان طور که در شکل 5 نشان داده شده، با افزایش چگالی انرژی لیزر تا مقدار 1.71 J/mm<sup>2</sup> که مربوط نمونه LA5 می باشد زبری سطح چسبنده آلومینیومی افزایش می یابد و با افزایش بیشتر چگالی انرژی لیزر به 3.81 J/mm<sup>2</sup> و 5.71 J/mm<sup>2</sup> در نمونه های LA6 و LA7 بدلیل ذوب شده سطح آلومینیوم زبری سطحی کاهش پیدا کرده است.



**Fig. 6** Images of roughness produced by different process of surface treatment for CFRP adherent, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S  
شکل 6 تصویر زبری ایجاد شده با فرآیندهای مختلف آماده سازی سطح برای چسبنده کامپوزیتی الف) نمونه LA1، ب) نمونه LA2، ج) نمونه LA3، د) نمونه LA4، ه) نمونه LA5، و) نمونه LA6، ز) نمونه LA7، ح) نمونه PP، ط) نمونه S



**Fig. 4** Schematic of  $C^{1/3}$  vs. crack length  $a$  [17]

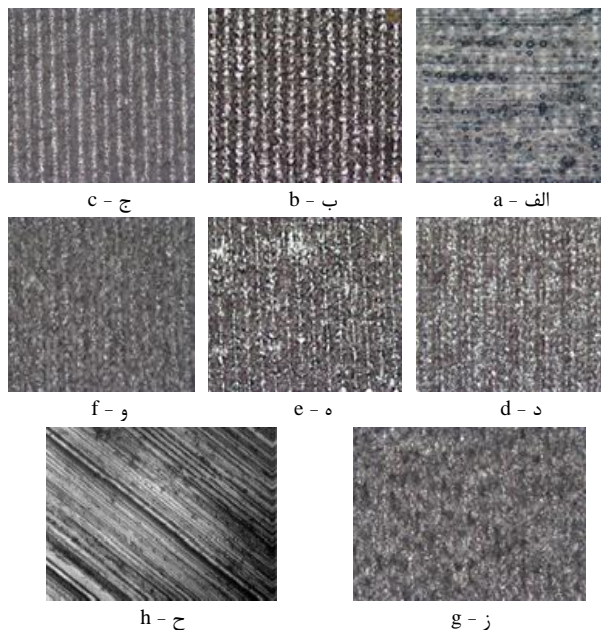
شکل 4 شماتیک منحنی  $C^{1/3}$  را بر حسب طول ترک  $a$

### 3- نتایج

در این قسمت نتایج بدست آمده از شکل شناسی سطوح عملیات سطحی شده و آزمون تجربی مود اول شکست اتصال چسبی با حالت های مختلف آماده سازی سطح اتصال ارائه شده است.

#### 1-3 شکل شناسی سطوح

در این قسمت شکل شناسی میکروسکوپی و عکسبرداری سطوح عملیات سطحی شده و همچنین زبری متوسط سطح چسبنده ها ارائه شده است. شکل 5 تصویر میکروسکوپی از سطح چسبنده های آلومینیومی عملیات سطحی شده با حالت های مختلف را نشان می دهد. با توجه به شکل 5 سطوح آلومینیومی عملیات سطحی توسط لیزر از یک الگوی همگن برای ایجاد زبری پیروی کرده، اما روش سنباده زنی یک سطح ناهمگن را ایجاد کرده است. از طرفی با توجه به شکل 5 با افزایش چگالی انرژی لیزر عمق شیارهای ایجاد شده در سطوح چسبنده های آلومینیومی افزایش پیدا کرده است.



**Fig. 5** Microscopic images of roughness produced by different process of surface treatment for AL adherent at 5x, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 5 تصویر میکروسکوپی زبری ایجاد شده با فرآیندهای مختلف آماده سازی سطح برای چسبنده آلومینیومی با بزرگنمایی 5 برابر الف) نمونه LA1، ب) نمونه LA2، ج) نمونه LA3، د) نمونه LA4، ه) نمونه LA5، و) نمونه LA6، ز) نمونه LA7، ح) نمونه S

در شکل 8 نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از آزمون مود اول شکست با رویکردهای متفاوت آماده‌سازی سطح اتصال نشان داده شده است. در نمودارهای نیرو - جابه‌جایی برای تشخیص شروع رشد ترک از روش انحراف از حالت خطی و بازدید چشمی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است تا مرحله شروع رشد ترک رفتار تمام نمودارها خطی می‌باشد، سپس با اعمال جابه‌جایی بیشتر رشد ترک اتفاق افتاده است. با افزایش چگالی انرژی لیزر و افزایش زبری سطح چسبیده‌ها بار بحرانی شروع رشد ترک افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شکل 8.e بیشترین بار برای نمونه‌های عملیات سطحی شده توسط لیزر در نمونه LA5 و به مقدار 116.347 N در جابه‌جایی نقطه اعمال بار 6.451 mm اتفاق افتاده است. در شکل 8.e و 8.f بار بحرانی شروع رشد ترک اختلاف کمی با یکدیگر دارد اما بعد از شروع رشد ترک افت‌های ناگهانی در نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل 8.f مشاهده می‌شود که این افت‌های ناگهانی می‌تواند باعث کاهش نرخ رهایی انرژی کرنشی گردند. همچنین همان‌طور که در شکل 8.h نشان داده شده است، در نمونه عملیات سطحی شده به روش پوسته‌کنی بیشترین بار به مقدار 120.51 N در جابه‌جایی 9.68 mm اتفاق افتاده است. برای نمونه عملیات سطحی شده با روش سنباده‌زنی (نمونه SS) بار بحرانی شروع رشد ترک نسبت به نمونه PP و نمونه‌های LA5 و LA6 کاهش پیدا کرده است که بدلیل کاهش زبری سطحی چسبیده کامپوزیتی می‌باشد. با توجه به شکل‌های 7 و 8 افزایش چگالی انرژی لیزر باعث افزایش زبری سطح و افزایش بار بحرانی شروع رشد ترک شده است، اما در نمونه LA7 با وجود افزایش چگالی انرژی لیزر زبری سطح چسبیده‌ها کاهش پیدا کرده است و این موضوع باعث کاهش بار بحرانی شروع رشد ترک در نمونه LA7 شده است.

شکل 9 تصویر مسیر رشد ترک ثبت شده توسط دوربین دیجیتال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 9 در تمامی نمونه‌ها بعد از شروع رشد ترک ابتدا خرابی چسب<sup>3</sup> و سپس خرابی اتصال<sup>4</sup> در سطح تماس چسب و چسبیده کامپوزیتی مشاهده شده است. منحرف شدن مسیر رشد ترک به سمت سطح تماس چسبیده کامپوزیتی و چسب به دو دلیل می‌باشد؛ اول اینکه در دستگاه آزمون کشش جابه‌جایی به تکیه‌گاهی پایینی اعمال می‌گردد و تکیه‌گاه بالایی ثابت است، دوم اینکه نامتقارنی جزئی در سفتی خمشی و هندسه چسبیده کامپوزیتی و آلومینیومی می‌تواند عامل این اتفاق باشد.

در ادامه نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی نسبت به طول ترک (نمودار مقاومت در برابر رشد ترک) برای مود اول شکست برای تمامی نمونه‌ها در شکل 10 نشان داده شده است. در این نمودارها برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از روش تئوری تیر اصلاح شده استفاده شده است. نمودار مقاومت یا نمودار انرژی شکست بر حسب طول ترک برای مواد ترد مسطح است، چرا که انرژی سطح نسبت به خواص مواد تغییر نمی‌کند [18].

این درحالی است که زبری سطح ایجاد شده با روش سنباده‌زنی برای چسبیده آلومینیومی کمتر از نمونه‌های LA5، LA6 و LA7 می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار زبری متوسط برای چسبیده کامپوزیتی با روش پوسته‌کنی ایجاد شده است. همچنین نمونه‌های LA5، LA6 و LA7 که کمترین رزین باقی‌مانده در سطح را داشتند دارای زبری بیشتری نسبت به دیگر چسبیده‌های کامپوزیتی عملیات سطحی شده با روش لیزر می‌باشند. از طرفی روش سنباده‌زنی نسبت به نمونه‌های LA5 و LA7 دارای زبری کمتری می‌باشد.

### 2-3- نتایج آزمون مود اول شکست

در این قسمت نتایج بدست آمده از آزمون تجربی مود اول شکست اتصال چسبی با رویکردهای متفاوت آماده‌سازی سطح اتصال ارائه شده است. مطابق با استاندارد برای هر کدام از شرایط آماده‌سازی سطحی سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است.

ابتدا نمودارهای نیرو - جابه‌جایی بدست آمده برای نمونه‌های مود اول شکست ارائه شده است. مطابق با استاندارد ASTM D5528 برای تشخیص شروع رشد ترک در نمودار نیرو و جابه‌جایی می‌توان از سه روش انحراف از حالت خطی<sup>1</sup> (NL)، بازدید چشمی<sup>2</sup> (VIS) و انحراف 5٪ بار بحرانی حداکثر استفاده نمود [17]. در روش انحراف از حالت خطی بار بحرانی برای شروع رشد ترک، انحراف از حالت خطی یا همان شروع غیرخطی شدن نمودار بار - جابه‌جایی می‌باشد. در روش بازدید چشمی با استفاده از دوربین مجهز به لنز مخصوص (چشم مسلح) شروع رشد ترک در حین بارگذاری رصد می‌شود. در روش انحراف 5٪ بار بحرانی حداکثر پس از بدست آوردن منحنی بار - جابه‌جایی، خطی از محل شروع منحنی اولیه رسم شده، طوری که به مقدار نرمی اولیه بدست آمده از قسمت خطی نمودار 5٪ اضافه می‌شود. اگر خط جدید منحنی بار - جابه‌جایی را در محلی بعد از نقطه بار حداکثر قطع کرد، در این صورت بار حداکثر به عنوان بار بحرانی شروع رشد ترک در نظر گرفته می‌شود.

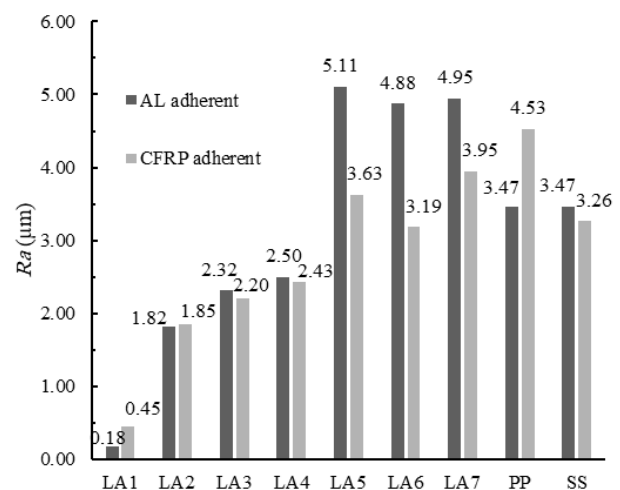


Fig. 7 Average roughness of AL and CFRP adherent

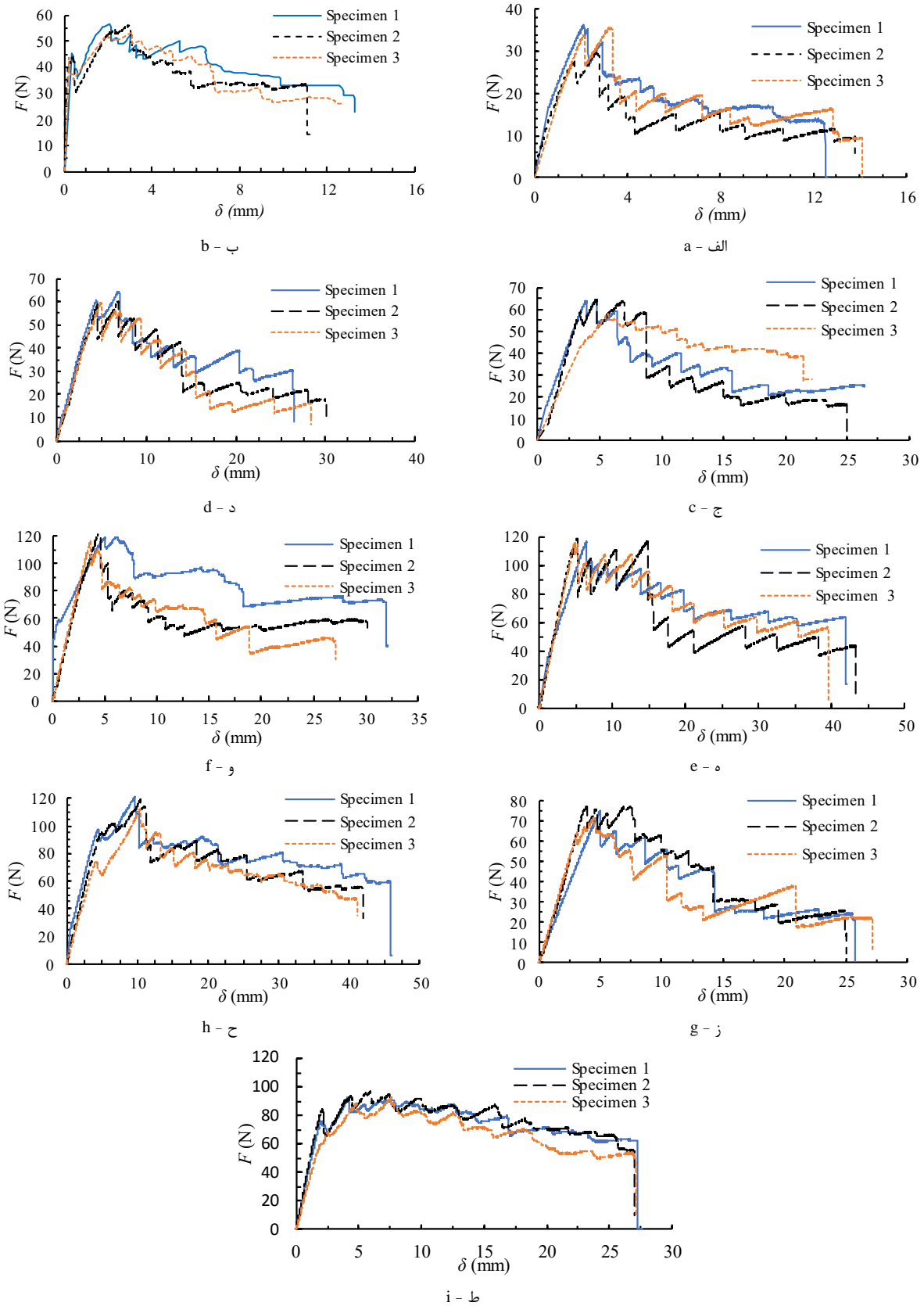
شکل 7 اندازه زبری متوسط سطح چسبیده‌های آلومینیومی و کامپوزیتی

<sup>1</sup> Deviation from Linearity

<sup>2</sup> Visual Observation

<sup>3</sup> Cohesive Failure

<sup>4</sup> Adhesive Failure



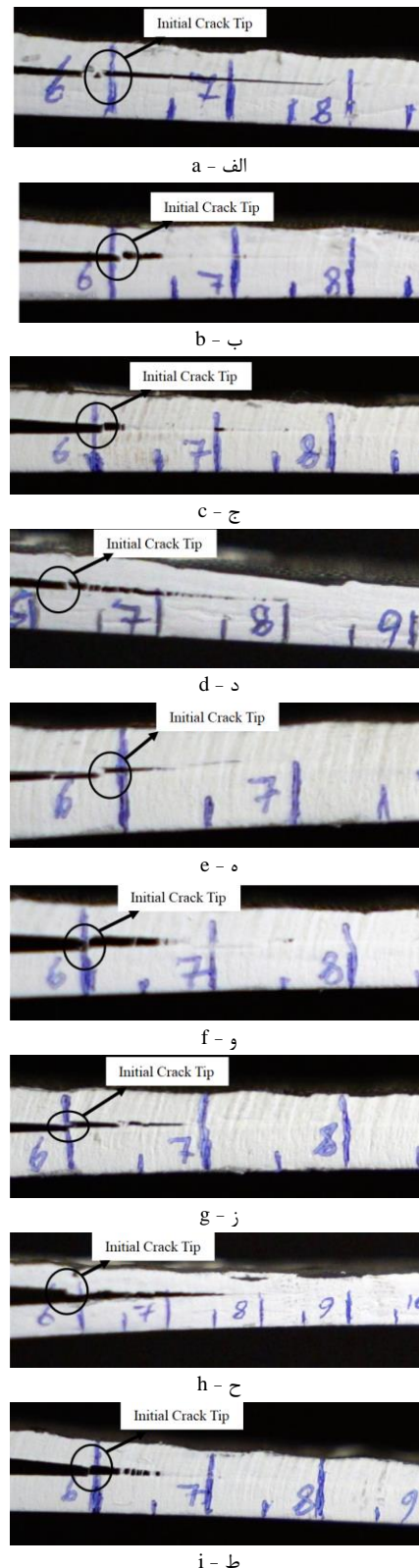
**Fig. 8** Load – displacement curve, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 8 نمودار نیرو - جابه‌جایی (الف) نمونه LA1، (ب) نمونه LA2، (ج) نمونه LA3، (د) نمونه LA4، (ه) نمونه LA5، (و) نمونه LA6، (ز) نمونه LA7، (ح) نمونه PP، (ط) نمونه S

با توجه به شکل 10 نرخ رهایی انرژی کرنشی برای تمامی نمونه‌ها به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند، که بیانگر رفتار ترد<sup>1</sup> برای چسب استفاده شده در اتصال می‌باشد. همچنین مقاومت اتصال در برابر رشد ترک برای نمونه‌های LA5 و PP بیشترین مقدار می‌باشد. با توجه به شکل 6 و 7 در نمونه LA5 چسبنده کامپوزیتی دارای حداقل مقدار رزین باقی مانده در سطح اتصال و بیشترین مقدار زبری سطح نسبت به دیگر چسبنده‌های کامپوزیتی عملیات سطحی شده توسط لیزر می‌باشد، از طرفی برای نمونه فوق چسبنده آلومینیومی دارای بیشترین مقدار زبری سطح می‌باشد که باعث مقاومت بیشتر در برابر رشد ترک برای نمونه LA5 شده است. همچنین با توجه به شکل 9.e که مربوط به نمونه LA5 می‌باشد، نمودار مقاومت در برابر رشد ترک بعد از یک مقدار افزایش اولیه از طول ترک 85 mm به بعد به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند که بیانگر پایداری بیشتر رشد ترک در نمونه فوق می‌باشد.

در شکل 10.f نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک برای نمونه LA6 را نشان داده شده است، روند کاهشی در رفتار نمودار مقاومت ماده مشاهده می‌شود که بدلیل افت‌های ناگهانی در مقدار نیرو در نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه فوق ایجاد شده است. افت‌های ناگهانی در نمودار نیرو - جابه‌جایی می‌تواند بدلیل کاهش زبری سطح آلومینیوم و CFRP نسبت به نمونه LA5 باشد. همچنین در شکل 10.g نیز روند کاهشی در رفتار نمودار مقاومت ماده مشاهده شده است. همانند شکل 10.f افت ناگهانی نیرو در نمودار نیرو - جابه‌جایی می‌تواند بدلیل کاهش زبری سطح آلومینیوم نسبت به نمونه LA5 ایجاد گردد. این افت‌های ناگهانی در مقدار نیرو باعث کاهش ناگهانی در مقدار نرمی ( $\frac{\delta}{P}$ ) نمونه‌های فوق می‌گردد که در نتیجه آن روند کاهشی در نمودار مقاومت ماده مشاهده می‌شود. از طرفی با توجه به معادله (4) نرخ رهایی انرژی کرنشی وابستگی مستقیم به مقدار نیرو و جابه‌جایی دارد پس افت ناگهانی در مقدار نیرو می‌تواند باعث روند کاهشی در نمودار مقاومت ماده در برابر رشد ترک باشد.

در ادامه مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست محاسبه شده است. جدول 4 مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی بدست آمده از آزمایش تجربی به همراه انحراف معیار<sup>2</sup> (SD) آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شکل 11 مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست نشان داده شده است. با توجه به شکل بیشترین مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول مربوط به نمونه LA5 و به مقدار 0.67 N/mm می‌باشد. بررسی زبری سطح و شکل‌شناسی سطح نمونه LA5 نشان دهنده بیشترین مقدار زبری برای چسبنده کامپوزیتی می‌باشد. بررسی نتایج شکل 10 بترتیب نشان دهنده افزایش 13.43% و 7.46% در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست برای نمونه LA5 در مقایسه با نمونه S و PP می‌باشد. همچنین با توجه به شکل 11 می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش آماده‌سازی سطح پوسته‌کنی برای چسبنده کامپوزیتی نسبت به روش سنباده‌زنی در حالتی که برای هر دو حالت چسبنده آلومینیومی با سنباده مشابه آماده‌سازی شده باشد می‌تواند باعث افزایش 6.45% در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست گردد.



**Fig. 9** Crack growth path a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S  
 شکل 9 مسیر رشد ترک (الف) نمونه LA1، (ب) نمونه LA2، (ج) نمونه LA3، (د) نمونه LA4، (ه) نمونه LA5، (و) نمونه LA6، (ز) نمونه LA7، (ح) نمونه PP، (ط) نمونه S

<sup>2</sup> Standard deviation

<sup>1</sup> Brittle



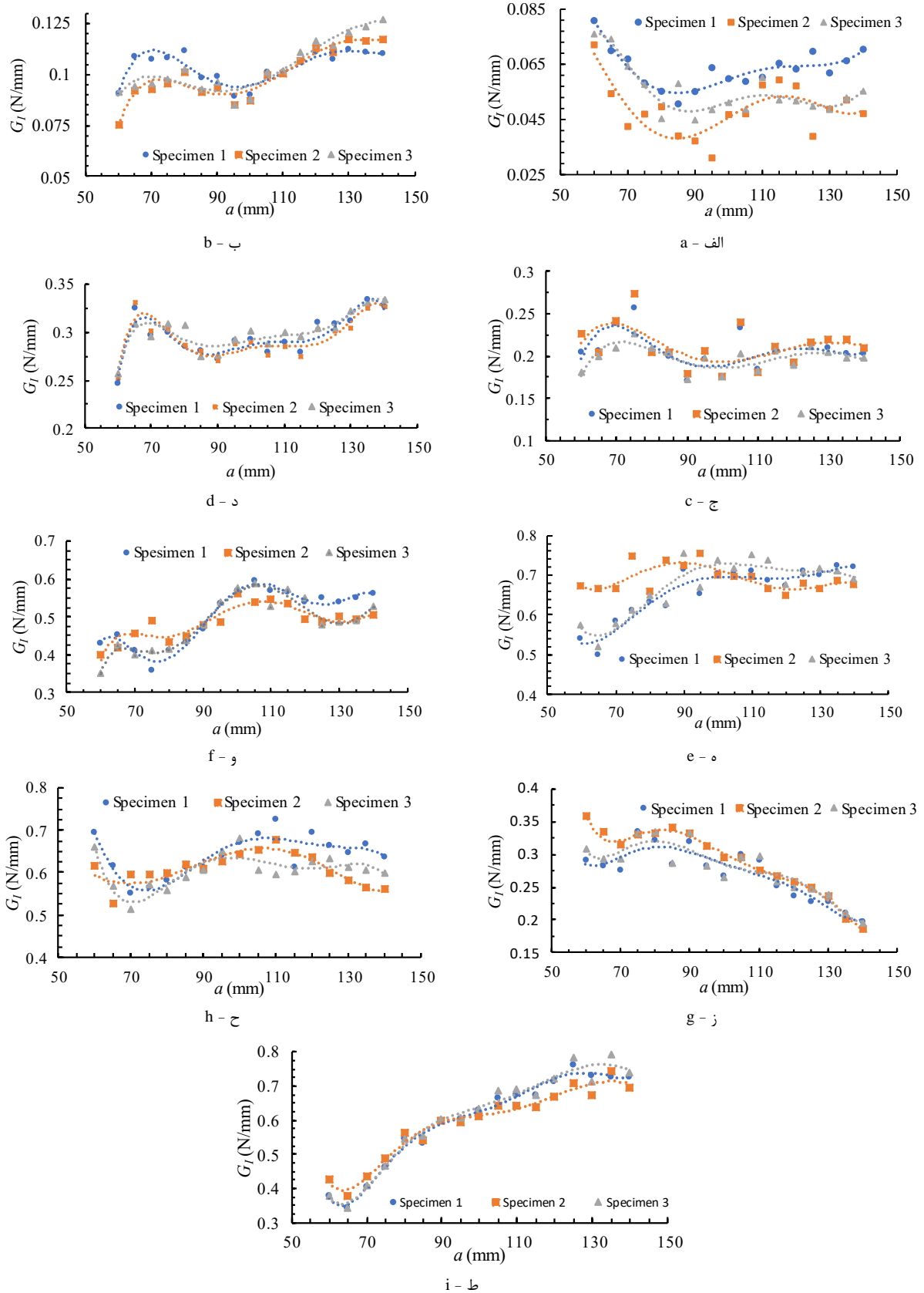
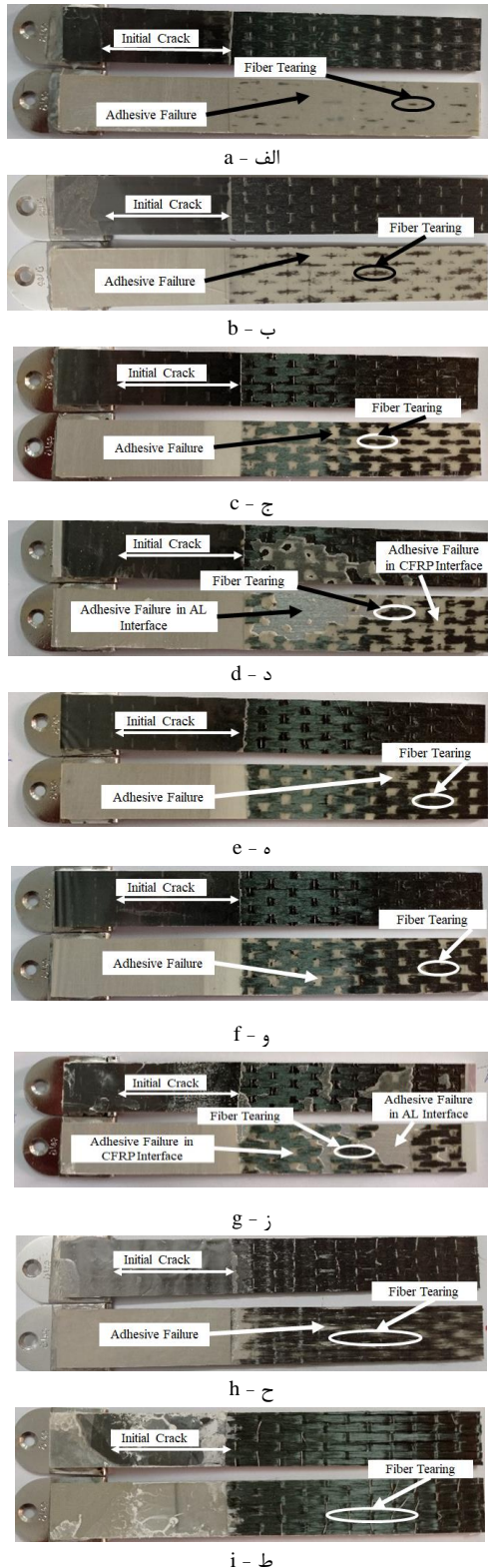


Fig. 10 R - curve, a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen PP, i) specimen S

شکل 10 نمودار مقاومت در برابر رشد ترک (الف) نمونه LA1، (ب) نمونه LA2، (ج) نمونه LA3، (د) نمونه LA4، (ه) نمونه LA5، (و) نمونه LA6، (ز) نمونه LA7، (ح) نمونه (ط) PP، (ی) نمونه S



**Fig 12** Fracture surface with different surface treatment approaches a) specimen LA1, b) specimen LA2, c) specimen LA3, d) specimen LA4, e) specimen LA5, f) specimen LA6, g) specimen LA7, h) specimen S, i) specimen PP

شکل 12 سطح شکست با حالت‌های مختلف عملیات سطحی الف) نمونه LA1، ب) نمونه LA2، ج) نمونه LA3، د) نمونه LA4، ه) نمونه LA5، و) نمونه LA6، ز) نمونه LA7، ح) نمونه PP، ط) نمونه S

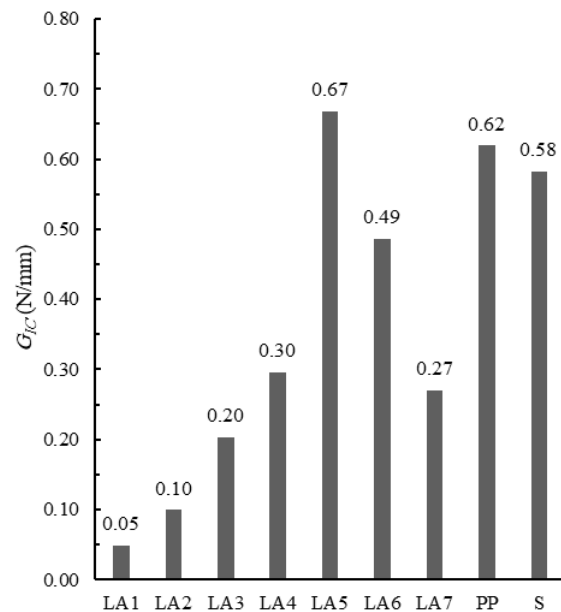
جدول 4 نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی با رویکردهای مختلف آماده‌سازی

سطحی و انحراف معیار

**Table 4** Critical strain energy release rate with different surface treatment approaches and standard deviation

SD	میانگین $G_{Ic}$ (N/mm)	$G_{Ic}$ (N/mm)			نمونه
		Specimen3	Specimen2	Specimen1	
0.01	0.05	0.05	0.04	0.06	LA-1
0.02	0.1	0.1	0.08	0.12	LA-2
0.02	0.2	0.18	0.22	0.2	LA-3
0.01	0.3	0.29	0.3	0.31	LA-4
0.02	0.67	0.67	0.69	0.65	LA-5
0.03	0.49	0.46	0.5	0.53	LA-6
0.02	0.27	0.25	0.3	0.26	LA-7
0.02	0.62	0.61	0.6	0.65	PP
0.01	0.59	0.6	0.59	0.57	SS

در ادامه سطح شکست نمونه‌ها با حالت‌های مختلف عملیات سطحی در شکل 12 مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل 12.a که مربوط به نمونه LA1 می‌باشد، شکست اتصال<sup>1</sup> در سطح تماس بین چسب و چسبیده کامپوزیتی اتفاق افتاده است این در حالی است که مقدار جزئی پارگی الیاف<sup>2</sup> هم مشاهده شده است. اما با افزایش چگالی انرژی لیزر و در نتیجه افزایش زبری سطح چسبیده‌ها در نمونه‌های LA2 و LA3 به مقدار پارگی الیاف اضافه شده و خرابی اتصال در سطح تماس بین چسبیده کامپوزیتی و چسب کمتر می‌شود.



**Fig 11** Mode I critical strain energy release rate with different surface treatment approaches

شکل 11 نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول با رویکردهای مختلف آماده‌سازی سطح

<sup>2</sup> Fiber Tearing

<sup>1</sup> Adhesive Failure

سطحی شده توسط لیزر با افزایش چگالی انرژی لیزر مقدار رزین باقی مانده در سطح اتصال کاهش می‌یابد و باعث ایجاد پیوند بین الیاف و چسب شده که موجب افزایش استحکام اتصال می‌گردد.

با انتخاب درست پارامترهای دستگاه لیزر می‌توان نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول را برای چسب Araldite 2015 به مقدار  $0.67 \text{ N/mm}$  محاسبه نمود و استحکام اتصال را نسبت به روش سنباده‌زنی برای چسبنده‌ها  $13.43\%$  درصد افزایش داد.

استفاده از روش آماده‌سازی سطح پوسته‌کنی برای چسبنده کامپوزیتی نسبت به روش سنباده‌زنی در حالتی که برای هر دو حالت چسبنده آلومینیومی با سنباده مشابه آماده‌سازی شده باشد می‌تواند باعث افزایش  $6.45\%$  در مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست گردد.

برای آماده‌سازی سطوح اتصال انتخاب درست پارامترهای لیزر می‌تواند باعث افزایش زبری سطح آلومینیوم و همچنین کمترین رزین باقی‌مانده در سطح چسبنده کامپوزیتی گردد که در نتیجه آن رشد ترک پایدار اتفاق خواهد افتاد.

در اتصال چسبی پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به آلومینیوم چگالی انرژی لیزر بالا برای چسبنده آلومینیومی باعث ذوب شدن سطح چسبنده و کاهش زبری سطح چسبنده آلومینیومی و در نتیجه کاهش استحکام اتصال می‌گردد.

در اتصال چسبی پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن به آلومینیوم منحرف شدن مسیر رشد ترک به سمت چسبنده کامپوزیتی و ایجاد حالت خرابی پارگی الیاف در سطح تماس چسب و چسبنده کامپوزیتی استحکام اتصال را افزایش می‌دهد.

#### 5- فهرست علائم

$a$	طول ترک (mm)
$B$	عرض نمونه تیر یکسرگیردار دولبه (mm)
$C$	نرمی نمونه (mm/N)
$E$	مدول یانگ (GPa)
$ED$	چگالی انرژی لیزر ( $\text{J/mm}^2$ )
$F$	بار اعمالی (N)
$h$	ضخامت چسبنده (mm)
$P$	توان نامی دستگاه لیزر (W)
$Ra$	زبری متوسط ( $\mu\text{m}$ )
$V$	سرعت اسکن لیزر (mm/min)

#### علائم یونانی

$\delta$	جابه‌جایی نقطه اعمال بار (mm)
$\Delta$	طول اصلاح شده ترک مود اول (mm)
$\nu$	ضریب پواسون (بی‌بعد)
$\varnothing_s$	قطر دایره لیزر ( $\mu\text{m}$ )

#### زیر نویس‌ها

AL	آلومینیوم
c	بحرانی
CFRP	کامپوزیت

در اتصال چسبی کامپوزیت- فلز ایجاد خرابی اتصال در سطح مشترک فلز و چسب بدلیل پیوند مولکولی ضعیف‌تر فلز با چسب و همچنین ایجاد شکست ترد<sup>1</sup>، باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد [19]. با توجه به شکل 12.d که مربوط به نمونه LA4 می‌باشد، سه نوع شکست، خرابی اتصال در تماس چسب و چسبنده آلومینیومی، خرابی اتصال در سطح تماس چسب و چسبنده کامپوزیتی و پارگی الیاف مشاهده شده است. بررسی تصویر میکروسکوپی از سطح چسبنده آلومینیومی نمونه LA4 که در شکل 5.d نشان‌دهنده ذوب شدن سطح آلومینیوم برای نمونه فوق می‌باشد که در نتیجه مقاومت سطح آلومینیوم کاهش پیدا کرده و باعث ایجاد خرابی اتصال در سطح تماس چسبنده آلومینیومی و چسب شده است.

در اتصال چسبی الیاف کربن به فلز حالت خرابی پارگی الیاف حالت شکست مناسب می‌باشد که باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد [20]. در شکل 12.e برای نمونه LA5 مقدار زیادی پارگی الیاف که حالت شکست مناسب در اتصال چسبی الیاف کربن به فلز می‌باشد و مقدار کمی شکست در سطح تماس چسب و چسبنده آلومینیومی اتفاق افتاده است. این موضوع باعث شده است که نمونه LA5 بیشترین مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست را نتیجه دهد. اما برای نمونه LA7 با توجه به شکل 12.g شکست اتصال در سطح تماس چسب و چسبنده آلومینیومی، شکست اتصال در سطح تماس چسب و چسبنده کامپوزیتی و پارگی الیاف مشاهده شده است. ایجاد حالت خرابی اتصال در سطح تماس چسب و آلومینیوم باعث ایجاد شکست ترد برای نمونه LA7 می‌شود، در نتیجه نمودار مقاومت ماده برای نمونه فوق روند کاهشی پیدا کرده و نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول کاهش یافته است، با توجه به شکل 5.g بدلیل ذوب شده سطح چسبنده آلومینیومی در چگالی انرژی لیزر  $5.71 \text{ J/mm}^2$  استحکام سطح آلومینیوم در نمونه LA7 کاهش می‌یابد و باعث ایجاد حالت خرابی اتصال در سطح تماس چسب و آلومینیوم برای نمونه فوق می‌گردد. همچنین برای نمونه PP که در شکل 12.h نشان داده شده است، مانند نمونه LA5 مود پارگی الیاف در سرتاسر سطح شکست به همراه مقدار جزئی خرابی اتصال در سطح تماس چسبنده کامپوزیتی و چسب شده است، که باعث رفتار مطلوب برای اتصال فوق گردیده است. برای نمونه S با توجه به شکل 12.i تنها حالت پارگی الیاف مشاهده شده، که این موضوع باعث کاهش نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست نسبت به نمونه‌های LA5 و PP شده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر عملیات سطحی چسبنده‌ها در رفتار شکست اتصال چسبی مود اول کامپوزیت / آلومینیوم مورد بررسی شده است. آماده‌سازی سطح اتصال چسبنده کامپوزیتی با سه رویکرد سنباده‌زنی، پوسته‌کنی و عملیات لیزری انجام شده است. همچنین چسبنده آلومینیومی با سه دو رویکرد سنباده‌زنی و عملیات لیزری برای اتصال آماده شده است. سپس تأثیر نوع عملیات سطحی بر رفتار شکست اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

برای چسبنده‌های آلومینیومی عملیات سطحی شده توسط لیزر با افزایش چگالی انرژی لیزر زبری سطحی افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر چگالی انرژی لیزر بدلیل ذوب شده سطح آلومینیوم زبری سطح کاهش یافته و باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد. همچنین برای چسبنده کامپوزیتی عملیات

<sup>1</sup> Brittle Fracture

## 6- مراجع

- [18] Anderson, T. L., "Fracture mechanics: fundamentals and applications", Third Edition, Boca Raton: CRC press, pp. 38-40, 2005.
- [19] Han, G., Tan, B., Cheng, F., Wang, B., Leong, Y.K. and Hu, X., "CNT toughened aluminium and CFRP interface for strong adhesive bonding", *Nano Materials Science*, Vol. 4, No. 3, pp. 266-275, 2022.
- [20] Chen, Y., Li, M., Yang, X. and Wei, K., "Durability and mechanical behavior of CFRP/Al structural joints in accelerated cyclic corrosion environments," *International Journal of Adhesion and Adhesives* Vol. 102, pp. 102695, 2020.
- [1] Mu, W., Na, J., Tan, W., Wang, G., Shen, H. and Li, X., "Durability of adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints subjected to coupled temperature and alternating load" *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 99, pp. 102583, 2020.
- [2] Alfano, M., Lubineau, G., Furguele, F. and Paulino, G. H., "Study on the role of laser surface irradiation on damage and decohesion of Al/epoxy joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 39, pp. 33-41, 2012.
- [3] Rotel, M., Zahavi, J., Tamir, S., Buchman A. and Dodiuk, H., "Pre-bonding technology based on excimer laser surface treatment", *Appl. Surface Sci.* Vol. 154-155, pp. 610-616, 2000.
- [4] Strobel, M., Lyons, C.S. and Mittal K.L., "Plasma Surface Modification of Polymers: Relevance to Adhesion", CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 201-210, 1994.
- [5] Fenga, Z., Zhaoa, H., Tana, C., Chena, B., Songa, X. and Feng, J., "Influence of laser process parameters on the characteristic of 30CrMnSiA steel substrate and adhesively bonded joints," *Optics and Laser Technology*, Vol. 123, pp. 105920, 2020.
- [6] Rudawska, A., "Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 50, pp. 235-243, 2014.
- [7] Sorrentino, L., Polini, W., Bellini, C. and Parodo, G., "Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 85, pp. 225-233, 2018.
- [8] Najafpour Mollabashi, M., Safarabadi, M., Haghghi Yazdi, M., "Experimental investigation of surface finishing in cracked aluminum plates reinforced by composite patch under fatigue loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 4, pp. 1171-1176, 2021.
- [9] Zhan, X., Li, Y., Gao, C., Wang, H. and Yang, Y., "Effect of infrared laser surface treatment on the microstructure and properties of adhesively CFRP bonded joints", *Optics and Laser Technology*, Vol. 106, pp. 398-409, 2018.
- [10] Sun, C., Min, J., Lin, J., Wan, H., Yang, S. and Wang, S., "The effect of laser ablation treatment on the chemistry, morphology and bonding strength of CFRP joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 84, pp.325-334, 2018.
- [11] Tao, R., Alfano, M. and Lubineau, G., "Laser-based surface patterning of composite plates for improved secondary adhesive bonding", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 109, pp. 84-94, 2018.
- [12] Moreira, R. D. F., Oliveira, V., Silva, F. G. A., Vilar, R. and De Moura, M. F. S. F., "Influence of femtosecond laser treated surfaces on the mode I fracture toughness of carbon-epoxy bonded joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 82, pp.108-113, 2018.
- [13] Kim, W. S. and Lee, J. J., "Fracture characterization of interfacial cracks with frictional contact of the crack surfaces to predict failures in adhesive-bonded joints", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 76, No. 12, pp. 1785-1799, 2009.
- [14] Indeck, J., Demeneghi, G., Mayeur, J., Williams, C. and Hazeli, K., "Influence of reversible and non-reversible fatigue on the microstructure and mechanical property evolution of 7075-T6 aluminum alloy", *International Journal of Fatigue*, Vol. 145, pp. 106094, 2020.
- [15] De Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. and Gonçalves, J.P.M., "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, No. 6, pp. 1589-1595, 2009.
- [16] Musiari, F., Moroni, F., Favi C. and Pironi, A., "Durability assessment of laser treated aluminium bonded joints", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 93, pp. 102323, 2019.
- [17] ASTM, D5528-01: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, *American Standard of Testing Methods*, vol. 03, no. Reapproved 2007. pp. 1-12, 2014.